کمینه‌سازی تابع هدف چندمتغره بااستفاده از الگوریتم ژنتیک بهبودیافته در کنترل فعال نوسان‌های سازه*

علی بنائی[۱] جواد علامتیان[۲]

چکیده *مقالهٔ پیش‌رو فرایند نوینی در کنترل فعال سازه‌ها دربرابر بار دینامیکی ناشی از زلزله، برمبنای روش‌های جستجوی عددی هوشمند ارائه می‌دهد. در اینجا، با متصل کردن عملگر دینامیکی به درجه‌های آزادی سازه و استفاده از روش الگوریتم ژنتیک پیشنهادی برای یافتن نیروهای کنترلی مناسب در هرگام زمانی باتوجه به وضعیت جابه‌جایی گره‌ها، تغییرمکان سازه کنترل و کمینه می‌شود. جابه‌جایی‌های گره‌ای سازه در هرگام زمانی با حل معادله‌های تعادل دینامیکی به‌دست می‌آیند. با ارزیابی این جابه‌جایی‌ها و استفاده از تابع هزینهٔ پیشنهادی، نیروهای عملگرها با فرایند تخمین- تصحیح الگوریتم ژنتیک تعیین می‌شوند. هم‌چنین، به‌دلیل ماهیت تخمین- تصحیح روش الگوریتم ژنتیک، اثر تأخیر زمانی در کنترل نوسان‌های سازه درنظر گرفته می‌شود. برای نشان دادن کارایی روش پیشنهادی در کنترل نوسان‌های سازه، سه نمونهٔ عددی به‌کار می‌رود و نتایج با روش سامانگر درجه‌دوی خطی (**LQR**) مقایسه می‌گردند. بر این اساس، روش پیشنهادی توانایی مناسبی برای کنترل نوسان‌های سازه دارد.*

واژه‌های کلیدی **الگوریتم ژنتیک، کنترل فعال سازه، روش LQR، تحلیل عددی.**

Minimizing Multivariate Objective Function Using Improved Genetic Algorithm in Active Control of Oscillation of Structures

A. Banaei J. Alamatian

Abstract *This paper aims to design a special active control system based on the proposed genetic algorithm for active control of structures. In this trend, by connecting the actuator to the structure's freedom degrees and using the proposed method to find the proper control forces, the structure's movement is controlled and minimized. The nodal displacements are calculated by solving the dynamic equations of motion at each time step. By evaluating these responsese and utilizing the proposed cost function, the proper actuator's forces are determined during the prediction-correction process of the genetic algorithm. Moreover, due to the nature of the prediction-correction of the genetic algorithm method, the effect of time delay on the control scheme is mentioned. To illustrate the effectiveness of the proposed method for controlling the oscillations of the structure, three numerical examples are solved and the results are compared with the linear differential equation (LQR) method. Accordingly, the proposed method has a very good ability to control the oscillations of the structure.*

Key Words Genetic Algorithm, Structures Active Control, LQR Method, Numerical Analysis.

---

* *تاریخ دریافت مقاله ۹۵/۱۰/۱۳ و تاریخ پذیرش آن ۹۷/۶/۲۴ می‌باشد.*

(۱) دانشجوی دکتری عمران- سازه، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد.

(۲) نویسندهٔ مسئول، دانشیار گروه عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد.

Email*:* alamatian@mshdiau.ac.ir

مقدمه

سازهٔ هوشمند، سازه‌ای است که با دارا بودن امکان یادگیری و با مناسب‌سازی مشخصات فیزیکی و هندسی، خود را دربرابر تحریک خارجی حفظ می‌نماید. بااستفاده از شیوهٔ کنترل فعال و متصل نمودن عملگرهایی در درجه‌های آزادی دینامیکی این سازه‌ها، نیروهایی برای کاهش جابه‌جایی درجه‌های آزادی که ناشی از تحریک خارجی است، تولید و به سازه اعمال می‌گردند [1]. نگرهٔ استفاده از شیوه‌های فعال برای کنترل نوسان‌های سازه، نخستین بار در سال ۱۹۷۲ مطرح گردید [2]. پس‌ازآن، پژوهشگران این فرایند را توسعه دادند [3,4]. به‌کارگیری شیوهٔ کنترل فعال، نیازمند بهره‌گیری هم‌زمان از ابزار کنترلی مناسب و هم‌چنین الگوریتمی هوشمند برای تعیین نیروهای عملگر در سازه می‌باشد.

شیوه‌های پایش داده‌های سازه و یافتن نیروهای مناسب عملگرها برای مقابله با اثر تحریک‌های جانبی در هر گام زمانی دارای اهمیت ویژه‌ای است. استفاده از روش‌های عددی در تحلیل دینامیکی سازه‌ها و بهینه‌سازی سامانه‌های کنترل فعال سازه از دو جهت موردتوجه فراوان قرار گرفته‌است. نخستین دلیل، عدم وابستگی این روش‌ها به محدودیت‌های گرادیان مشتق‌های بهینه‌سازی می‌باشد. از سوی دیگر، سرعت روش‌های عددی درمقایسه با شیوه‌های تحلیلی، به‌دلیل عدم نیاز به مدل‌سازی‌های پیچیده، بسیار بالاست [5]. روش‌های جستجوی هوشمند، مبتنی بر الگوهای تکامل طبیعی، نمونه‌ای از این شیوه‌های نوین می‌باشند. الگوریتم ژنتیک یکی از قدرتمندترین و مؤثرترین شیوه‌های جستجوی عددی است که در فرایندهای بهینه‌سازی به‌کار می‌رود.

پیشرفت‌های اولیهٔ الگوریتم ژنتیک توسط جان هالند و همکارانش [6] در دانشگاه میشیگان ایالات متحده در سال ۱۹۶۲ انجام پذیرفت. هم‌چنین، مفاهیم الگوریتم ژنتیک در سال ۱۹۸۹ توسط گلدبرگ[7] توسعه داده شد. در سال ۱۹۹۵، کیریستوفر هاک و همکارانش[8] الگوریتم ژنتیک را بااستفاده از برنامهٔ متلب پیاده کردند. هم‌چنین، صفی‌زاده و همکاران[9] پژوهش‌هایی برای یافتن محل مناسب حسگر در سامانه‌های فعال و غیرفعال، بااستفادهٔ هم‌زمان از شیوهٔ بهینه‌سازی توسعه‌یافته و الگوریتم ژنتیک، انجام دادند. در سال ۲۰۱۲، یانگ و همکارانش[12-10] از یک الگوریتم چندهدفه برای یافتن بهترین محل حسگرها در سامانهٔ کنترلی بهره بردند. هم‌چنین، هیل و درجی [12] بااستفاده از این شیوه توانستند محل مناسب حسگر و عملگر را برای کمینه‌سازی نوسان‌های یک ورق طره‌ای تعیین کنند. عباسی و مرکزی[13]، در سال ۲۰۱٤، با بررسی اثر تعداد حسگر در بهبود رفتار لرزه‌ای سازه، روابطی را پیشنهاد نمودند. آنها بااستفاده از روش عددی نیومارک- بتا و به‌کارگیری الگوریتم ژنتیک چندهدفه برای مکان‌یابی محل حسگر، نوسان‌های سازه را با روش کنترل خطی مرتبه‌دوم گوسی تحلیل کردند. در سال ۲۰۱٦، پژوهش‌هایی توسط ژای و همکاران[14,15] برای بهینه‌سازی مشخصات عملگرهای پیزوالکتریک متصل به سازه، بااستفاده از الگوریتم ژنتیک انجام گرفت. آنان با بهره‌گیری از یک الگوریتم دوهدفه و رابطه‌سازی تابع هدف خطی مرتبه‌دو، توانستند مکان و مشخصات فیزیکی مناسب عملگرها را تعیین کنند.

در این پژوهش، یک فرایند نوین در الگوریتم ژنتیک برای یافتن نیروهای کنترلی مناسب در هر گام زمانی، پیشنهاد می‌شود. هدف این فرایند، کاهش جابه‌جایی‌های سازه می‌باشد. برای انجام این کار، نخست جابه‌جایی‌های گرهی سازه در هر گام زمانی، با حل معادله‌های تعادل دینامیکی به‌دست می‌آیند. سپس، با ارزیابی این جابه‌جایی‌ها و استفاده از تابع هزینهٔ

پیشنهادی، نیروهای عملگرها با فرایند تخمین- تصحیح الگوریتم ژنتیک پیشنهادی کاهش می‌یابد. درپایان، این شیوه برای کنترل نوسان‌های ۳ نمونه عددی مورداستفاده قرار می‌گیرد و نتایج با روش LQR به‌عنوان روشی متداول در کنترل فعال سازه‌ها مقایسه می‌گردد [16].

رابطه‌سازی معادلهٔ تعادل دینامیکی سازه در روش سامانگر درجه‌دوِی خطی (LQR)

معادلهٔ تعادل دینامیکی سازهٔ q درجهٔ آزادی را می‌توان به‌صورت زیر رابطه‌سازی کرد [17]:

$$[M]^i\{\ddot{D}\}^i+[C]^i\{\dot{D}\}^i+[K]^i\{D\}^i = -[M]^i\{\Gamma\}^i\ddot{x}_g(t)^i+\{\Lambda\}^i u(t)^i \qquad (۱)$$

در این رابطه $[M]^i$، $[C]^i$، $[K]^i$، $\{\Gamma\}^i$ و $\{\Lambda\}^i$ به‌ترتیب معرف ماتریس‌های جرم، میرایی، سختی، بردار موقعیت نیروهای خارجی واردشده به سازه و بردار موقعیت نیروی کنترلی اعمالی به سازه در گام زمانی iام هستند. چنان‌چه نیروهای زلزله و کنترلی به تمام طبقات سازه اعمال شوند، تمام درایه‌های بردار $\{\Gamma\}^i$ و $\{\Lambda\}^i$، برابر واحد خواهند بود. کمیت‌های $\{D\}^i$، $\{\dot{D}\}^i$ و $\{\ddot{D}\}^i$ بردارهای جابه‌جایی، سرعت و شتاب گرهی می‌باشند. هم‌چنین $\ddot{x}_g(t)^i$ و $u(t)^i$ به‌ترتیب شتاب پایه و نیروی کنترلی تولیدشده توسط عملگر متصل‌شده به سازه در گام زمانی iام هستند که پس از پایش سازه در هر گام زمانی، به سازه وارد می‌شوند. معادلهٔ (۱) برحسب متغیر حالت به‌صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\dot{Z}(t)=AZ(t)+Bu(t)+H\ddot{x}_g(t) \qquad (۲)$$

در رابطهٔ (۲)، Z(t) بردار حالت است که به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Z(t)=\begin{Bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{Bmatrix}_{2q\times q} \qquad (۳)$$

هم‌چنین سایر ضرایب رابطهٔ (۲)، به‌صورت زیر معرفی می‌گردند [18]:

$$A=\begin{bmatrix} O & I \\ -M^{-1}.K & -M^{-1}.C \end{bmatrix}_{2q\times 2q} \qquad (٤)$$

$$B=\begin{Bmatrix} O \\ M^{-1}.\lambda \end{Bmatrix}_{2q\times q} \qquad (۵)$$

$$H=\begin{Bmatrix} O \\ -M^{-1}.\Gamma \end{Bmatrix}_{2q\times q} \qquad (٦)$$

در رابطه‌های بالا، 0 ماتریس مربعی صفر و I ماتریس مربعی واحد می‌باشد. در روش LQR با کمینه‌سازی تابع انرژی J در هر گام زمانی، بردار نیروی کنترلی u(t) محاسبه می‌گردد. تابع انرژی سازه به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$J=\int_0^{\infty}\left(Z^T(t).Q.Z(t)+u^T(t).R.u(t)\right).dt \qquad (۷)$$

در این رابطه، مقدار Q و R نشانگر مقادیر وزنی هستند که بیانگر اهمیت متغیرهای حالت و نیروهای کنترل در فرایند کمینه‌سازی می‌باشند. هرچه مقدار بزرگ‌تری برای کمیت Q اختیار شود، به این معنی است که کاهش پاسخ سازه از اهمیت بیشتری برخوردار است و هرچه مقدار کمیت R بیشتر انتخاب شود، بیانگر آن است که بایستی میزان نیروهای کنترلی واردشده به سازه توسط عملگرها کاهش یابند. بر این اساس پژوهشگران ماتریس‌های وزنی مختلفی را پیشنهاد نموده‌اند [19-21].

مینیمم‌سازی تابع انرژی منجر به معادلهٔ زیر می‌شود [20]:

$$u(t)=G(t).Z(t)=-\frac{1}{2}R^{-1}B^T P(t).Z(t) \qquad (۸)$$

در رابطهٔ بالا P(t)، ماتریس ریکاتی نامیده می‌شود که از حل معادلهٔ ریکاتی زیر به‌دست می‌آید:

$$[A]^T[P]+[P][A]-[P][B][R]^{-1}[B]^T[P]+[Q]=0 \qquad (۹)$$

در فرایند کنترلی اخیر، الگوریتم جستجو در هر گام زمانی با محاسبهٔ بردار حالت، u(t) را برحسب تغییرمکان و سرعت محاسبه می‌کند که این نیرو توسط عملگرهای متصل‌شده به سازه اعمال می‌شوند.

روش نیومارک برای تحلیل دینامیکی سازه

در سال ۱۹۵۸، نیومارک[22] روشی برای تحلیل سامانه های دینامیکی معرفی کرد. در این روش با به‌کارگیری دنبالهٔ تیلور، تغییرمکان و سرعت در پایان هر گام زمانی برآورد می شود؛ سپس باا ستفاده از عامل‌های وزنی، حاصل انتگرال جملهٔ پسماند در دنبالهٔ تیلور، به صورت رابطه‌های تقریبی زیر درنظر گرفته می‌شوند [23]:

$$\{D\}^{i+1} \approx \{D\}^{i} + \Delta t\{\dot{D}\}^{i} + (\tfrac{1}{2}-\beta)\Delta t^{2}\{\ddot{D}\}^{i} + \beta\Delta t^{2}\{\ddot{D}\}^{i+1} \quad (۱۰)$$

$$\{\dot{D}\}^{i+1} \approx \{\dot{D}\}^{i} + (1-\gamma)\Delta t\{\ddot{D}\}^{i} + \gamma\Delta t\{\ddot{D}\}^{i+1} \quad (۱۱)$$

در رابطه‌های بالا، Δt گام زمانی در هر گام تحلیل است. هم‌چنین، β و γ عامل‌های وزنی روش نیومارک- بتا می‌باشند. در این پژوهش از روش نیومارک- بتا با شتاب ثابت استفاده می‌شود و عامل‌های وزنی به‌ترتیب، $\beta=\frac{1}{4}$ و $\gamma=\frac{1}{2}$ می‌باشد. چنان‌چه، هدف تحلیل دینامیکی سازه، تعیین جابه‌جایی، سرعت و شتاب در گام‌های زمانی گوناگون باشد، باید دستگاه معادله‌های به‌دست‌آمده از رابطه‌های ۱، ۱۰ و ۱۱ حل گردد. از سوی دیگر، می‌توان این رابطه‌ها را به‌گونه‌ای بازنویسی کرد که بتوان جابه‌جایی سازه در هر گام زمانی را به‌صورت مستقیم حساب کرد. در نتیجه، رابطهٔ (۱) به‌صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$\left([K]^{i+1} + \frac{[M]}{\beta\Delta t^{2}} + \frac{\gamma[C]}{\beta\Delta t}\right)\{D\}^{i+1} = \{P\}^{i+1} - \{F_a\}^{i} +$$
$$[M]\left(\frac{1}{\beta\Delta t^{2}}\{D\}^{i} + \frac{1}{\beta\Delta t}\{\dot{D}\}^{i} + \left(\frac{1}{2\beta}-1\right)\{\ddot{D}\}^{i}\right) + \quad (۱۲)$$
$$[C]^{i+1}\left(\frac{\gamma}{\beta\Delta t}\{D\}^{i} + \left(\frac{\gamma}{\beta}-1\right)\{\dot{D}\}^{i} + \left(\frac{\gamma}{2\beta}-1\right)\Delta t\{\ddot{D}\}^{i}\right)$$

گفتنی است روش نیومارک- بتا، یک شیوهٔ ضمنی ا ست. در این شیوه، برای به‌د ست آوردن پا سخ در گام زمانی i+1ام، از معادلهٔ تعادل دینامیکی در همان گام استفاده می‌شود. برای این کار، سامانهٔ دینامیکی به سامانهٔ ایستای معادل تبدیل می شود، به‌گونه‌ای که تغییرمکان، سرعت و شتاب، به‌طور هم‌زمان در معادله‌های تعادل دینامیکی سازه صدق می‌کند.

مبانی و رابطه‌سازی روش پیشنهادی

یافتن مقدارهای مناسب نیروهای کنترلی در هر لحظه، سبب کاهش جابه‌جایی سازه می‌گردد. هرچه الگوریتمِ جستجو، توانایی یافتن مقدارهای مناسب‌تری را برای نیروهای عملگر داشته باشد، جابه‌جایی سازه کمتر می- شود. درروش پیشنهادی، به‌جای استفاده از رابطهٔ (۷) برای یافتن نیروی عملگر، از شیوهٔ جستجوی عددی الگویتم ژنتیک استفاده می‌شود. الگوریتم ژنتیک یک شیوهٔ جستجوی عددی فرگشتی است که با پایش سازه در هر گام زمانی، به یافتن مقدارهای بهینهٔ نیروهای کنترلی، بااستفاده از مفهوم تابع جریمه می‌پردازد. الگوریتم ژنتیک پس از تولید جمعیت اولیه شامل اعضای احتمالی پاسخ مسئله، که همان نیروهای کنترلی می‌باشند، بااستفاده از الگوهای فرگشتی و صلاحیت‌سنجی، اعضای دارای صلاحیت بیشتر را به‌گونه‌ای تکامل می‌دهد که نیروهای مناسب‌تری به‌دست آید. الگوریتم ژنتیک شامل زیربخش‌هایی است که درادامه ارائه می‌شوند.

تابع هدف

برای دست‌یابی به کمترین تغییرمکان در درجه‌های آزادی دینامیکی سازه، لازم است با تعریف تابع هدف، که معرف

نحوهٔ عملکرد سامانهٔ دینامیکی است، نیروی عملگر به‌گونه‌ای حساب شود که این تابع کمینه گردد. در این فرایند، نخست، عضوهای انتخابی توسط الگوریتم ژنتیک در معادله تعادل دینامیکی سازه قرار دادن جابه‌جایی‌ها در تابع هدف و برازش داده‌ها، پاسخ سازه در اثر اعمال نیروی‌های کنترلی ارزیابی می‌شود. پس‌ازآن، روند جستجوی تخمین- تصحیح به‌گونه‌ای ادامه می‌یابد که در هر تلاش، محاسباتی با انتخاب نیروهای جایگزین و تکرار این فرایند، مناسب‌ترین نیروها به‌گونه‌ای پیدا شوند که تابع هدف کمینه گردد. در این حالت، سازه در بهترین شرایط کنترلی قرار می‌گیرد. پس‌ازآن، نیروهای مناسب توسط عملگر به سازه وارد می‌شوند و الگوریتم در گام زمانی بعد تکرار می‌گردد.

هدف الگوریتم ژنتیک یافتن نیروهای کنترلی است، به‌گونه‌ای که جابه‌جایی سازه به کمترین مقدار ممکن کاهش یابد. درنتیجه تابع هدف به‌گونه‌ای رابطه سازی می شود که دربرگیرندهٔ جابه‌جایی‌های همهٔ درجه‌های آزادی دینامیکی سازه باشد. هرچه مقدار عددی این تابع کاهش یابد، نیروهای انتخاب‌شده توسط الگوریتم جستجو، مناسب‌تر ارزیابی می‌شوند. در این پژوهش، تابع هدف برای سازهٔq درجهٔ آزادی به صورت زیر معرفی می‌گردد:

$$C=\sum_{n=1}^{q}\sqrt{x_n^2} \qquad (13)$$

در اینجا، x_i جابه‌جایی درجهٔ آزادی nام سازهٔ کنترل‌شده می‌باشد. تابع هدف پیشنهادی (رابطهٔ ۱۳)، بااستفاده از معیارهای کنترلی، برای کاهش جابه‌جایی طبقات پیشنهاد گردیده‌است. باید دانست، پس از بررسی دیگر تابع‌های هدف، به مناسب‌ترین تابع دست‌یافته‌اند. در فرایند جستجوی الگوریتم ژنتیک، نیاز است محدودیت‌های طراحی در روند جستجو موردتوجه قرار گیرند. توجه به این محدودیت‌ها (قیدها) سبب عملکرد بهتر الگوریتم جستجو دریافتن نیروهای کنترلی مناسب می‌گردد. نحوهٔ اضافه کردن این قیدها به تابع هدف، با شیوه‌های گوناگون امکان‌پذیر است. در این پژوهش، از روش تابع جریمه استفاده می‌شود. تابع جریمه به‌گونه‌ای عمل می‌کند که هرچه پاسخ‌های سازهٔ کنترل‌شده با قیدها سازگاری کمتری داشته باشند، مقدار تابع هدف افزایش می‌یابد به‌گونه‌ای که آن نیروهای کنترلی توسط الگوریتم انتخاب نمی‌شوند. با افزودن تابع جریمه به تابع هدف، تابع هدفِ مقیّد به‌گونه‌ای به‌دست می‌آید که امکان بهره-گیری از فرایند جستجوی مستقیم عددی برای یافتن نیروهای کنترلی، بااستفاده از معادلهٔ تعادل دینامیکی سازه فراهم گردد. درنتیجه، الگوریتم جستجو تابع هدف مقید را کمینه می‌کند. معیارهای پیشنهادشده در این پژوهش، به‌صورت زیر می‌باشند:

$$\text{معیار}\,1=\sqrt{\sum_{n=1}^{q}(x_n-\overline{x})^2} \quad , \quad \overline{x}=\frac{\sum_{n=1}^{q}(x_n)}{q} \qquad (14)$$

$$\text{معیار}\,2=\sum_{n=1}^{q}\left(\max\left\{\frac{|x_n|}{\Delta x}-1,0\right\}\right) \qquad (15)$$

$$\text{معیار}\,3=\sum_{n=1}^{q}\frac{1}{|X_n-x_n|} \qquad (16)$$

در این رابطه‌ها، x_i، $\overline{x}$ و Δx به‌ترتیب، مقدار جابه-جایی درجهٔ آزادی nام سازه در حالت کنترل‌نشده، انحراف معیار مقدارهای جابه‌جایی همهٔ درجه‌های آزادی سازه در گام زمانی موردنظر و مقدار جابه‌جایی مجاز سازه می‌باشند. همان‌گونه که بیان شد، رابطهٔ (۱۳) به‌گونه‌ای طراحی شده‌است که الگوریتم با کمینه کردن مجموع جابه‌جایی درجه‌های آزادی سازه، به بهترین نیروهای کنترلی دست یابد. باید دانست، دیگر عامل اثرگذار، تغییرمکان‌های نسبی سازه می‌باشند؛ زیرا ممکن است در شرایطی، معیار اول مناسب باشد (میانگین جابه-جایی‌های طبقه‌ها پذیرفتنی است)؛ ولی، مقدار تغییرمکان نسبی دوطبقهٔل مشخص زیاد شود. درنتیجه، معیار رابطهٔ

(۱۴)، با محاسبهٔ مقدار انحراف معیار بین داده‌ها، از هم‌گرا شدن پاسخ در این حالت جلوگیری می‌کند. از سوی دیگر، معیار پیشنهادی در رابطهٔ (۱۵) نشانگر خطای پاسخ الگوریتم، نسبت به مقدار جابه‌جایی مجاز Δx است. معیار معرفی‌شده در رابطهٔ (۱۶) نیز جابه‌جایی اصلاح‌شده در هر گام زمانی می‌باشد که توسط الگوریتم به‌دست آمده‌است. درنتیجه، با ترکیب معیارهای ۱۴، ۱۵، ۱۶ با رابطهٔ (۱۳)، تابع هدف مقید پیشنهادی، به‌صورت زیر حاصل می‌شود:

$$\bar{C} = \sum_{n=1}^{q} \left[\sqrt{x_n^2} + \alpha\sqrt{x_n^2 .(x_n - \bar{x})^2} + \beta\left(\sqrt{x_n^2}.\max\left\{\frac{|x_n|}{\Delta x} - 1, 0\right\}\right) + \gamma\frac{\sqrt{x_n^2}}{|X_n - x_n|}\right] \quad (17)$$

رابطهٔ (۱۷)، برای برازش و صلاحیت‌سنجی عضوهای جستجوشونده در الگوریتم ژنتیک استفاده می‌شوند. در این رابطه مقدارهای α، λ و μ ضریب‌های وزنی هستند که باتوجه به میزان اهمیت هر عامل تعیین می‌گردند. در این پژوهش، این مقدارها به‌ترتیب ۱، ۱/۱، و ۰/۲ درنظر گرفته شده‌اند. این مقدارها پس از مدل‌سازی‌های گوناگون، به‌صورت تجربی به‌دست آمده‌اند. باید افزود، در پژوهش‌های انجام‌شده به‌روش فرگشتی، معیارهایی برای انتخاب این ضریب‌های وزنی و دیگر عامل‌ها ارائه شده‌است که همهٔ آنها نیز تجربی می‌باشند. در این پژوهش، نویسندگان از ضریب‌های به‌دست‌آمده از نتایج مدل‌سازی خود بهره گرفته‌اند. هم‌چنین، از تابع جریمه به‌صورت جمع شونده استفاده شده‌است. شایان توجه است، برای جلوگیری از بروز خطا به‌دلیل منفی و مثبت بودن مقدارهای کمّی تغییرمکان‌ها، رابطهٔ معیارِ برازش به‌گونه‌ای تنظیم شده‌است که همهٔ مقدارها مثبت گردند تا مقایسهٔ آنها توسط برنامهٔ الگوریتم تهیه‌شده به‌درستی انجام پذیرد.

تابع برازش و انتخاب

پس از رابطه‌سازی تابع هدف مقید، با بهره‌گیری از این تابع‌ها، داده‌های باصلاحیت بیشتر در هر گام انتخاب می‌شوند. برنامهٔ رایانه‌ای تهیه‌شده به‌گونه‌ای عمل می‌کند که در هر گام زمانی i ام، به‌ازای تعداد مشخصی از عضوهای جمعیت نخستین، معادلهٔ تعادل دینامیکی با روش جستجوی عددی نیومارک- بتا، در بازهٔ زمانی Δt ثانیه تحلیل می‌گردد. سپس، داده‌های خروجی برای هر یک از عضوهای جمعیت نخستین (والدین)، محاسبه می‌شنود. بااستفاده از تابع برازش و انتخاب، تعداد مشخصی از عضوهای باصلاحیت بیشتر انتخاب می‌گردند و به گام زمانی $i+1$ ام انتقال می‌یابند. هم‌چنین، باتوجه به نیاز روش‌های جستجوی عددی به داده‌های گام پیشین، اطلاعات نهایی هر گام به‌عنوان شرایط نخستین گام بعدی ذخیره‌سازی می‌شوند و به گام بعد منتقل می‌گردند. برای مشخص شدن ابعاد جمعیت و تعداد عضوهای تولیدشده در هر گام، لازم است متغیرهای مربوط به عملگرهای ژنتیکی مشخص گردند [24] و [25].

عملگرهای ژنتیکی

برای دست‌یابی به نیروهای کنترلی مناسب که شرایط توقف فرایند را برقرار کنند، لازم است با راه‌کاری نیروهای جدیدی تولید شوند و در تابع هدف مقید جای‌گذاری و ارزیابی گردند. برای انجام این کار، از دو عملگر ژنتیکی پیوند (ترکیب) و جهش برای تولید نیروهای جدید جمعیت استفاده می‌شود. درحقیقت، الگوریتم با بهره‌گیری از این عملگرها، به تولید نیروهای جدید و جستجو در فضای مسئله می‌پردازد. عملگر پیوند، با ترکیب خواص وراثتی دو عضو از جمعیت نخستین، عضوهای جدیدی تولید می‌کند. اگرچه عملگر پیوند، جستجوی مؤثری را در فضای طراحی دنبال می‌نماید و رشته‌های مناسب را تولید می‌کند، گاهی سبب از

بین رفتن ویژگی‌های مفید رشته‌های ژنتیکی می‌شود. هم‌چنین، این عملگر امکان دست‌یابی به ویژگی‌های جدیدی را که در اعضای والد وجود ندارد فراهم نمی‌کند؛ ازاین‌رو، بهره‌گیری از عملگر جهش برای دست‌یابی به عضوهایی با ویژگی‌های تصادفی جدید، لازم می‌باشد. عملگر جهش با تغییر در ساختار ژنتیکی عضوها، به تولید عضوهای جدید می‌پردازد [24].

مراحل الگوریتم ژنتیک در حل مسئلهٔ بهینه‌سازی

هستهٔ الگوریتم ژنتیک استفاده‌شده در این پژوهش همانند دیگر مراجع است. در اینجا، تنها معیارهای تابع هزینه و نحوهٔ برنامه‌نویسی بهبود یافته‌اند، به‌گونه‌ای که با درنظر گرفتن اثر تأخیر زمانی، یک شیوه کارامد پیشنهاد گردید. شایان توجه است، بررسی‌های انجام‌شده توسط نویسندگان نشان می‌دهند، به‌دلیل مشکل تأخیر زمانی، تاکنون از الگوریتم ژنتیک در سامانه‌های کنترل واقعی استفاده نشده‌است. کاهش تأخیر زمانی یکی از دستاوردهای این پژوهش است که راه را برای استفاده از الگوریتم ژنتیک در سامانه‌های کنترل فعال هموار می‌سازد. باید دانست، رابطه‌سازی تابع هزینه، عامل‌های وزنی و شیوهٔ مدل کردن آنها از دیگر نوآوری‌های این پژوهش می‌باشند.

از سوی دیگر، برای بررسی کارایی روش پیشنهادی، لازم است نتایج این شیوه با پاسخ‌های مناسب مقایسه شوند. باتوجه به پژوهش‌های پیشین می‌توان دریافت روش LQR به‌عنوان یکی از شیوه‌های پایه‌ای در حل معادلات تعادل دینامیکی سازه در کنترل فعال سازه، توانسته‌است پاسخ‌های بسیار مناسبی را در کنترل فعال سازه‌های مختلف ارائه دهد. درنتیجه پاسخ‌های روش پیشنهادی با روش LQR مقایسه می‌شوند.

برای درک نحوهٔ عملکرد الگوریتم ژنتیک در فرایند کنترل سازه، زیربخش‌های این شیوه ارائه می‌گردد:

در مرحلهٔ نخست، مجموعه‌ای از نیروهای مناسب احتمالی، توسط الگوریتم ژنتیک تولید می‌گردد. این جمعیت نخستین از نیروهای احتمالی، بااستفاده از داده‌های موجود در مورد طرح‌های ممکنِ مسئله، تعیین می‌شوند. چنان‌چه اطلاعاتی از طرح‌های ممکن مسئله وجود نداشته باشد، این جمعیت به‌صورت تصادفی انتخاب می‌گردد. این نیروهای تولیدشده توسط الگوریتم، همان نیروهای کنترلی عملگر متصل‌شده به سازهٔ میزبان، در لحظهٔ نخست می‌باشند.

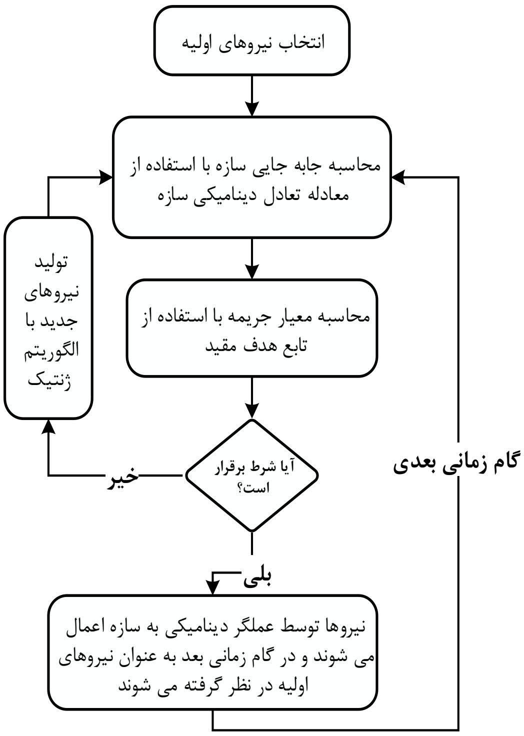
در مرحلهٔ دوم، نیروهای تولیدشده به‌عنوان جمعیت نخستین، در معادله‌های تعادل دینامیکی جای‌گذاری می‌شوند و مقدار جابه‌جایی در هر درجهٔ آزادی دینامیکی از سازه به‌دست می‌آید. به‌کارگیری روش نیومارک- بتا و تبدیل معادلهٔ تعادل دینامیکی برمبنای محاسبهٔ مستقیم جابه‌جایی، سبب سرعت بخشیدن به روند محاسبهٔ تغییرمکان در هر گام زمانی می‌گردد. پس‌ازآن، با جای‌گذاری این مقدارها در تابع هدف مقید که باتوجه به قیدها و محدودیت‌های موردانتظار مسئله رابطه‌سازی شده‌است، مقدار صلاحیت هر یک از نیروهای کنترلی برآورد می‌شود. چنان‌چه نیروهای کنترلی دارای بیشترین صلاحیت، شرایط مسئله را تحقق نبخشند، الگوریتم این نیروها را به‌عنوان پاسخ نهایی در گام زمانی موردنظر ذخیره می‌کند. سپس، حل به مرحلهٔ نخست منتقل می‌شود و این فرایند برای گام زمانی بعدی ادامه می‌یابد. این روند تا پایان دورهٔ زمانی انجام می‌شود. چنان‌چه نیروهای کنترلی دارای بیشترین صلاحیت، در شرایط پایان مسئله صدق نکنند، الگوریتم با بررسی و مرتب کردن نیروها برحسب مقدار صلاحیت متناظر، تعداد مشخصی از آنها را بااستفاده از یک روش انتخابی از پیش تعریف‌شده، انتخاب می‌کند. شایان توجه است، در روش‌های عددی متکی بر سعی‌وخطا، توجه به اثر تأخیر زمانی در طول فرایند پایش بسیار ضروری است. در اینجا، برای اعمال اثر این تأخیر زمانی، بااستفاده از زیربرنامه‌ای، میزان زمان سپری‌شده از آغاز ورود برنامه الگوریتم به حلقهٔ

جستجوی نیروهای کنترلی تا زمان خروج از آن (انتخاب نیروهای کنترلی مناسب در گام زمانی موردنظر)، حساب می‌شود. د نتیجه، در گام زمانی بعد، مقدار نیروی اعمال‌شده از طرف تحریک خارجی، متناسب با زمان سپری‌شده توسط برنامه، خوانده می‌شود و به سازه اعمال می‌گردد. هم‌چنین، در هر گام زمانی، پس از یافتن نیروی کنترلی، شرایط تغییرمکان سازه با درنظر گرفتن میزان تأخیر زمانی گام پیشین (تأخیر زمانی گام پیشین بسیار نزدیک به تأخیر زمانی در گام مورد ارزیابی است)، تا لحظهٔ پس‌از اعمال تأخیر بااستفاده از رابطهٔ (۱۲) به‌دست می‌آید و برای انتقال به گام بعد، ذخیره می‌گردد.

در مرحلهٔ سوم، بااستفاده از عملگرهای ژنتیکی در نیروهای کنترلی انتخاب‌شده مرحلهٔ دوم، مجموعهٔ جدیدی از نیروها تولید می‌شود. این مقدارها به نیروهای کنترلی تولید شده در مرحلهٔ دوم افزوده می‌گردد. باتوجه به ماهیت پیوستهٔ متغیرهای طراحی در مسئله‌های پیش‌رو، در این پژوهش از اعدادِ در مبنای دسیمال و به صورت پیوسته در فضای جستجوی مسئله استفاده شده‌است.

در مرحلهٔ چهارم، پس از تعیین بهترین نیروهای کنترلی در گام زمانی موردنظر، این مقدار به‌همراه داده‌های مربوط به جابه‌جایی درجه‌های آزادی و گام زمانی، ذخیره می‌گردند. هم‌چنین، باتوجه به نیاز روش عددی نیومارک- بتا به اطلاعات گام زمانی پیشین، داده‌های این گام به‌عنوان شرایط نخستین گام بعد ذخیره می‌شوند.

در مرحلهٔ پنجم، با تولید جمعیت جدید متناسب با فضای مسئله و نیز استفاده از نیروهای کنترلی حاصل از مرحلهٔ چهارم، الگوریتم جستجو تکرار می‌شود. سپس، نیروهایی که شرایط پایان مسئله را برقرار کنند به‌همراه داده‌های مربوط به جابه‌جایی درجه‌های آزادی و گام زمانی ذخیره می‌شوند. هم‌چنین، در هر مرحله، بهترین نیروهای به‌دست‌آمده به‌عنوان نیروهای کنترلی مناسب در هر گام زمانی، به‌کمک عملگرهای دینامیکی متصل‌شده به سازهٔ میزبان، تولید و به سازه اعمال می‌شوند. شکل (۱) ساختار کلی الگوریتم ژنتیک پیشنهادی را نشان می‌دهد.



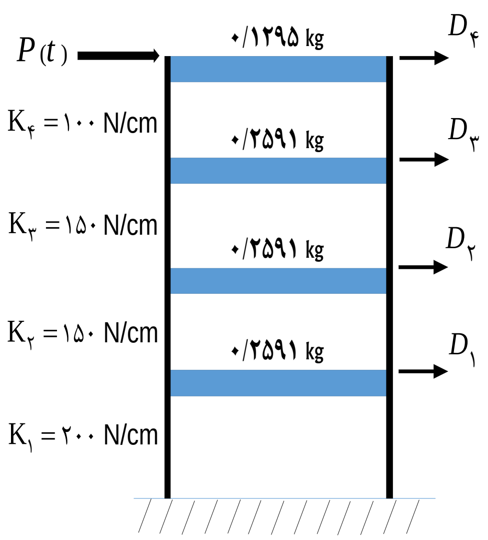
شکل ۱ فلوچارت ساختار کلی برنامهٔ تهیه‌شده

نمونه‌های عددی

برای ارزیابی الگوریتم پیشنهادی، برنامهٔ رایانه‌ای در نرم‌افزار متلب تهیه شده‌است. درادامه، سه نمونهٔ عددی ارائه می‌گردد. در نخستین مسئله، نوسان‌های سازهٔ چهار درجهٔ آزادی تحت اثر بار هارمونیک کنترل می‌شود. هم‌چنین، در نمونهٔ دوم، به کنترل نوسان‌های سازهٔ شش درجهٔ آزادی دینامیکی تحت اثر شتاب پایهٔ زلزله نورثریج در حوزهٔ نزدیک (peer RSN:1086) پرداخته می‌شود. در مسئلهٔ سوم، سازهٔ دوازده درجهٔ آزادی تحت شتاب پایهٔ زلزلهٔ کوبه در حوزهٔ دور (peer RSN:1105) موردارزیابی قرار می‌گیرد.

سازهٔ برشی چهار درجهٔ آزادی

مشـخصـات سـازهٔ برشـی چهار درجهٔ آزادی مطابق با شکل (۲) می‌باشد.



شکل ۲ سازه برشی چهار درجهٔ آزادی دینامیکی

در سازه پیش‌رو، نسبت میرایی برای نخستین مود نوسان ۵٪ است و دیگر مودهای نوسان نامیرا می‌باشند. از الگوی میرایی ریلی بـا دو عـامـل نیز برای تعیین ماتریس میرایی سازه استفاده می‌شود [17]. هم‌چنین، بار هارمونیک وارد به این سازه به‌صورت زیر است:

$$P(t) = ۵۰\cdot\sin(۱۰\cdot t) \qquad (۱۸)$$

در این سازه تنها یک عملگر به چهارمین درجهٔ آزادی سازه متصل می‌باشد. هم‌چنین به هر درجهٔ آزادی یک حسگر متصل است. با بهره‌گیری از روش الگوریتم ژنتیک پیشنهادی، نوسان‌های سازه کنترل می‌شود و پاسخ‌ها با شیوهٔ کنترلی LQR مقایسه می‌گردند. مقدار نیروی کنترلی یافت‌شده توسط الگوریتم، باتوجه به معادلات مودال و جابه‌جایی تمامی درجه‌های آزادی انتخاب می‌گردد. این الگوریتم در هرگام زمانی با تولید جمعیت‌های جدید و جستجو در فضای مسئله، می‌تواند نیروهای کنترلی مناسب را در دسترس قرار دهد. این فرایند سبب ایجاد تأخیر زمانی می‌گردد. در اینجا، اثر تأخیر زمانی در هرگام از محاسبات بررسی شده و در پاسخ‌های به‌دست‌آمده وارد شده‌است. برای انجام این کار، اثر تأخیر زمانی در بارگذاری وارد می‌شود، به‌گونه‌ای‌که بار دینامیکی در گام زمانی بعدی به سازه اعمال می‌گردد (بارگذاری با تأخیر). باید دانست، برای دست‌یابی به مقدار تأخیر در هر گام زمانی، از زیربرنامه‌ای در الگوریتم رایانه‌ای استفاده می‌شود، به‌گونه‌ای که در هر حلقه از تلاش محاسباتی، مقدار زمان سپری‌شده محاسبه و ثبت می‌گردد. پس از یافتن نیروی کنترلی مناسب در گام زمانی موردنظر، گام زمانی بعدی برای جستجوی نیروهای کنترلی، از مجموع Δt و تأخیر زمانی ثبت‌شده به‌دست می‌آید. گفتنی است، فرایند کنترلی ارائه‌شده در این پژوهش مستقل از نوع ابزار اعمال نیروهای کنترلی به سازه است. در اینجا، می‌توان از عملگرهای پیزوالکتریک استفاده کرد؛ زیرا در این‌گونه ابزارها، تأخیر اعمال نیرو به سازه وجود ندارد (به‌دلیل ماهیت الکتریکی بودن آنها). در این سازه، میانگین تأخیر زمانی ثبت‌شده توسط برنامهٔ الگوریتم ژنتیک در هرگام زمانی به‌طور میانگین برابر ۰/۰۱۱ ثانیه است. هم‌چنین، تعداد عضوهای جمعیت تولیدشده توسط الگوریتم، ٦ عضو و تعداد تلاش در هر گام زمانی، ۲۰ سعی می‌باشند. نسبت‌های اعمال عملگر پیوند و جهش برروی عضوها نیز به‌ترتیب، برابر ۰/۸ و ۰/۳ می‌باشند. این نسبت‌ها باتوجه به نوع مسئله و با سعی‌وخطا انتخاب و تصحیح می‌گردند. دامنهٔ انتخاب این نسبت‌ها به نوع مسئله وابسته است [26]. در مراجع، دامنهٔ انتخاب نسبت‌های پیوند و جهش به‌صورت زیر تعریف پیشنهاد شده‌اند:

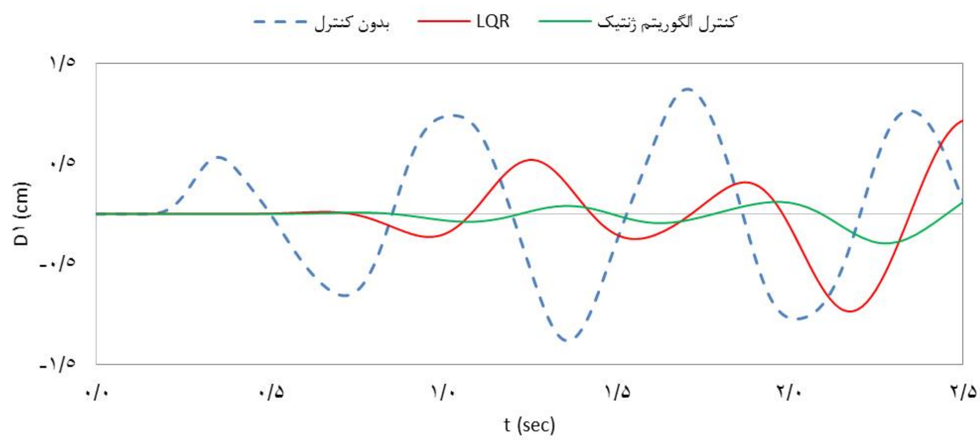
$$P_C = [۰/۶ \,,\, ۰/۹] \qquad (۱۹)$$

$$P_M = \left[1/_{\text{population size}} \,,\, 1/_{\text{chromosome length}} \right] \qquad (۲۰)$$

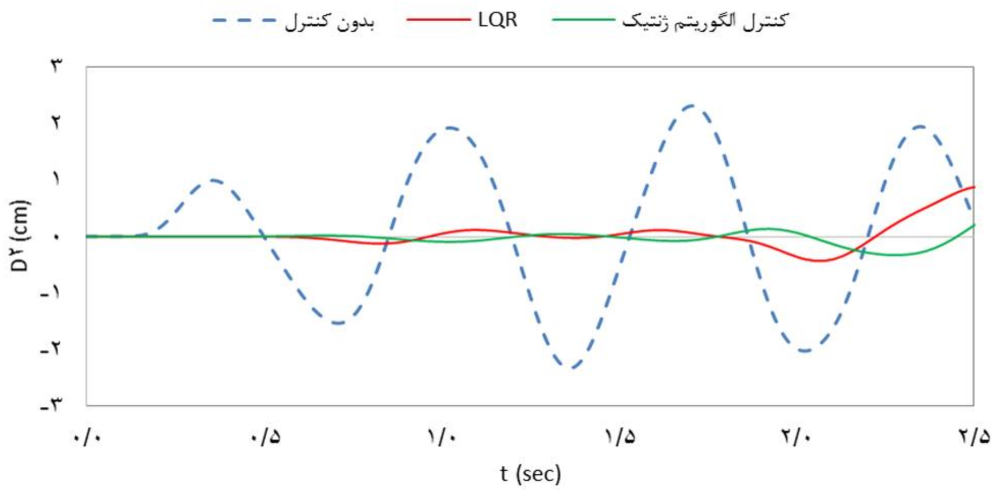
رابطهٔ (۲۰)، دامنهٔ انتخابی برای نسبت عملگر جهش برروی عضوها را نشان می‌دهد که کران پایین آن برابر با حاصل تقسیم یک بر تعداد اعضای جمعیت و کران بالای آن برابر با حاصل یک تقسیم بر طول کروموزم (تعداد متغیر جستجو) می‌باشد. شایان توجه است، الگوریتم ژنتیک پیشنهادی در حل نمونه‌های عددی این پژوهش بسیار کارامد می‌باشد؛ به‌گونه‌ای که تغییر در دامنهٔ این نسبت‌ها، اثر محسوسی در پاسخ‌ها ایجاد نمی‌کند.

جدول ۱ بیشینه تغییرمکان‌های درجه‌های آزادی سازهٔ چهار طبقه در روش‌های کنترل مختلف

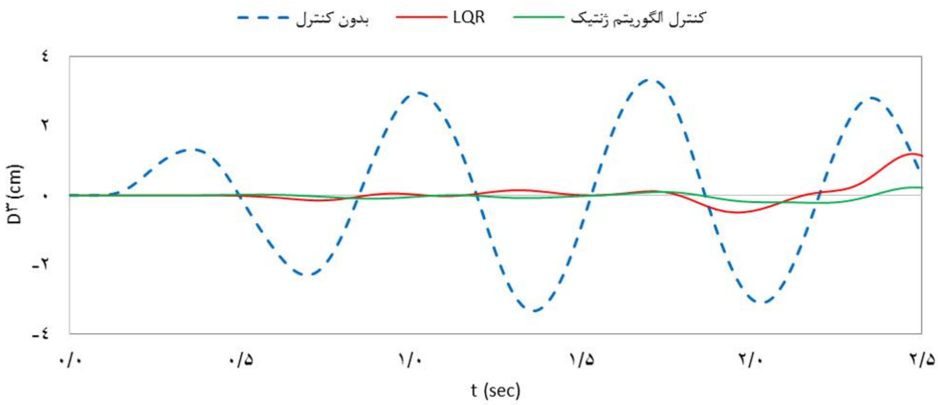
حالت پایش	طبقه ۱	طبقه ۲	طبقه ۳	طبقه ٤
بدون کنترل	۱/۲٦	۲/۳۳	۳/۳۳	۳/۸۹
روش LQR	۱/۰۹	۱/۳۷	۱/۹۹	۱/۷٦
الگوریتم ژنتیک	۰/٤۷	۰/۳۷	۰/٦۲	۰/۲۳



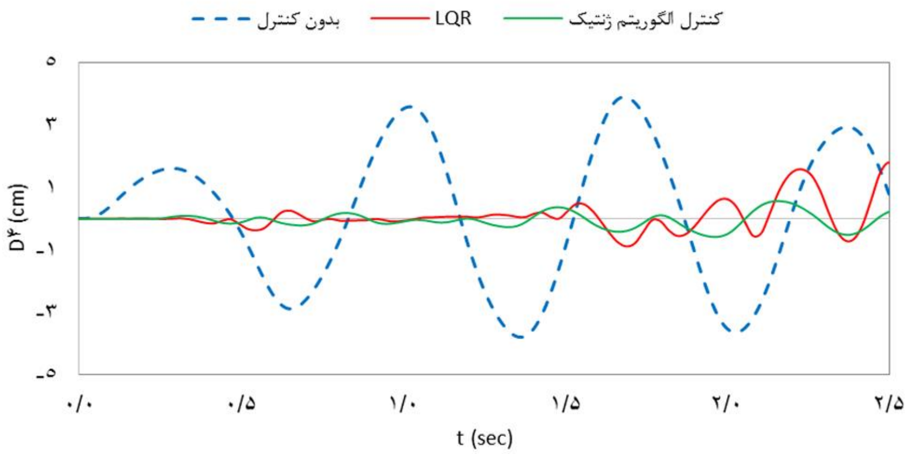
شکل ۳ تاریخچهٔ زمانی جابه‌جایی نخستین درجهٔ آزادی سازهٔ چهارطبقه با الگوریتم ژنتیک پیشنهادی



شکل ٤ تاریخچهٔ زمانی جابه‌جایی دومین درجهٔ آزادی سازهٔ چهارطبقه با الگوریتم ژنتیک پیشنهادی



شکل ۵ تاریخچهٔ زمانی جابه‌جایی سومین درجهٔ آزادی سازهٔ چهارطبقه با الگوریتم ژنتیک پیشنهادی

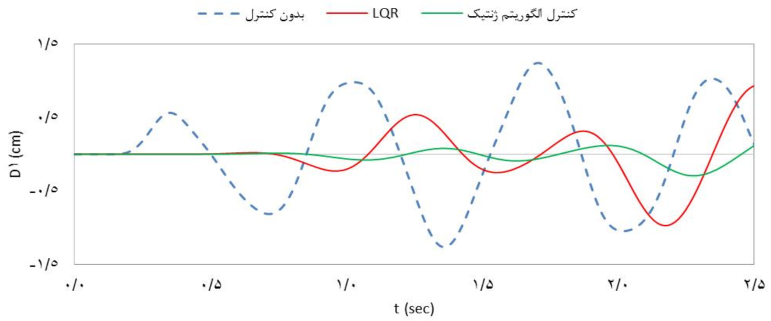


شکل ٦ تاریخچهٔ زمانی جابه‌جایی چهارمین درجهٔ آزادی سازهٔ چهارطبقه با الگوریتم ژنتیک پیشنهادی

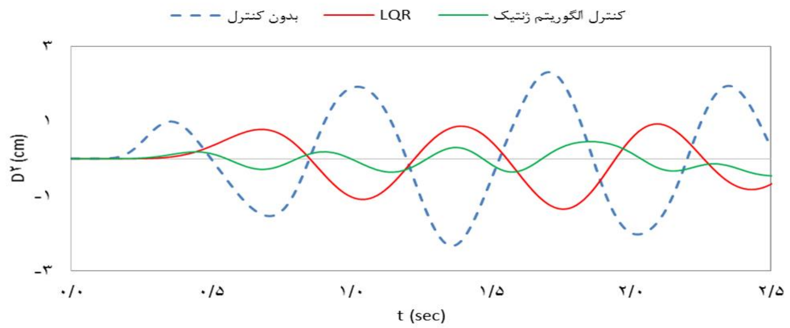
در شکل‌های (۳) تا (٦)، نمودارهای جابه‌جایی- زمان نخستین تا چهارمین درجهٔ آزادی سازهٔ چهارطبقه، در حالت‌های بدون سامانهٔ کنترلی، سامانهٔ کنترلی با روش LQR و هم‌چنین الگوریتم ژنتیک پیشنهادی را نشان می-دهد برپایهٔ این شکل‌ها می‌توان دریافت، کارایی الگوریتم ژنتیک پیشنهادی برای کنترل نوسان‌های سازه بیشتر از دیگر روش‌ها می‌باشد.

چنان‌چه محل اثر بارگذاری خارجی به درجهٔ آزادی سوم انتقال یابد، نمودارهای جابه‌جایی- زمان به‌صورت زیر خواهد بود:

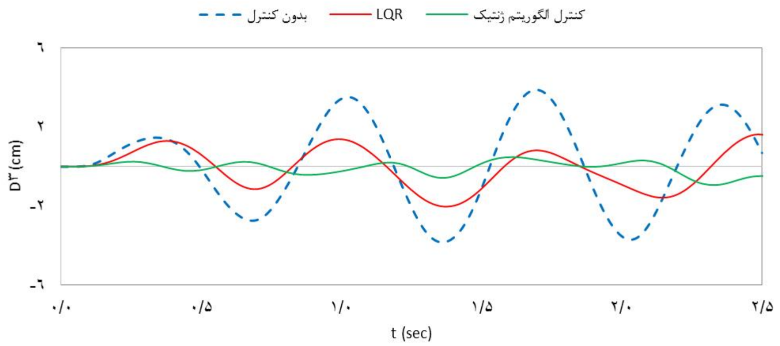
شکل‌های (۷) تا (۱۰) نشان‌دهندهٔ توانایی الگوریتم ژنتیک پیشنهادی برای کنترل نوسان‌های سازه می‌باشد. در جدول (۲) نیز مقدار بیشینهٔ تغییرمکان‌های سازهٔ چهار درجهٔ آزادی در حالت اعمال بار در درجهٔ آزادی سوم، بااستفاده از روش LQR و الگوریتم ژنتیک پیشنهادی، ارائه شده‌است. باتوجه به نمودارهای نشان داده‌شده، الگوریتم ژنتیک قادر خواهد بود تا باوجود یک عملگر در درجهٔ آزادی چهارم، جابه‌جایی طبقات سازهٔ ناشی از نیروی هارمونیک اعمالی به سایر طبقات را نیز در حد قابل‌قبول کنترل نماید.



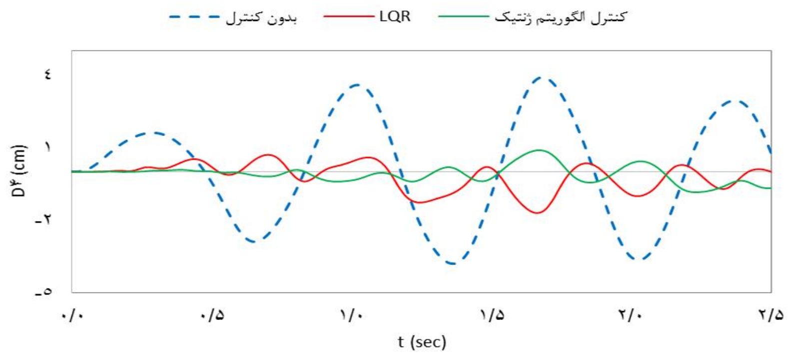
شکل ۷ تاریخچهٔ زمانی جابه‌جایی نخستین درجهٔ آزادی سازهٔ چهارطبقه با اعمال بار هارمونیک به طبقهٔ سوم



شکل ۸ تاریخچهٔ زمانی جابه‌جایی دومین درجهٔ آزادی سازهٔ چهارطبقه با اعمال بار هارمونیک به طبقهٔ سوم



شکل ۹ تاریخچهٔ زمانی جابه‌جایی سومین درجهٔ آزادی سازهٔ چهارطبقه با اعمال بار هارمونیک به طبقهٔ سوم



شکل ۱۰ تاریخچهٔ زمانی جابه‌جایی چهارمین درجهٔ آزادی سازهٔ چهارطبقه با اعمال بار هارمونیک به طبقهٔ سوم

جدول ۲ جدول مقایسهٔ بیشینهٔ تغییرمکان‌های سازهٔ چهار درجهٔ آزادی در حالت‌های مختلف پایش براساس الگوریتم‌های استفاده‌شده

حالت پایش	طبقهٔ ۱	طبقهٔ ۲	طبقهٔ ۳	طبقهٔ ٤
بدون کنترل	۱/۲۷	۲/۳۸	۳/۸۹	۳/۹۲
روش LQR	۱/۲۱	۱/۷۳	۲/٤۹	۱/۹٥
الگوریتم ژنتیک	۰/٤۲	۰/٦۲	۱/۱۸	۱/۰٥

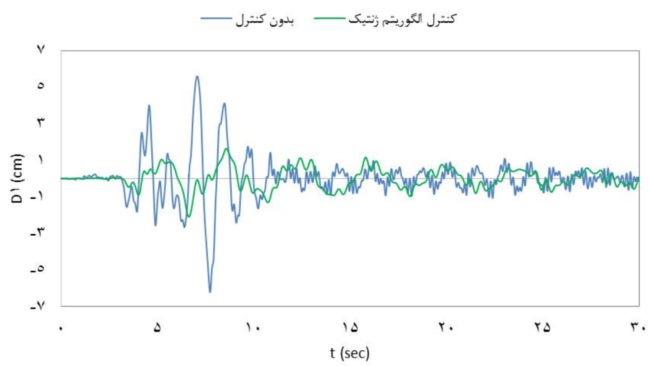
سازهٔ برشی شش درجهٔ آزادی دینامیکی

مشخصات ساختمان برشی با شش طبقه در جدول (۳) ارائه شده‌است.

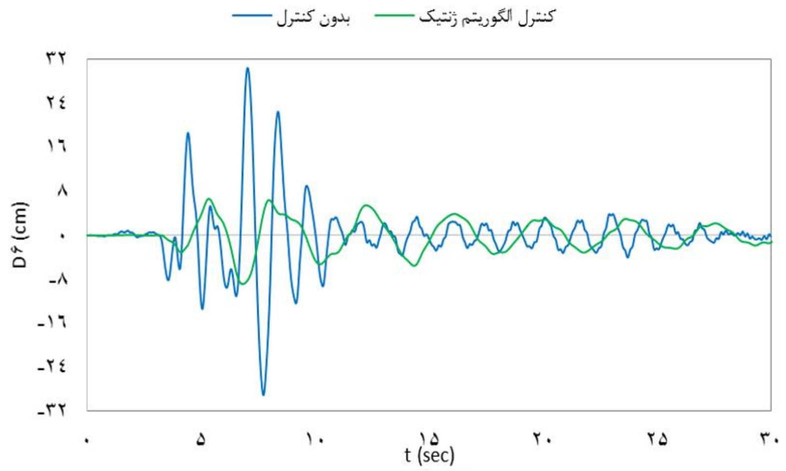
جدول ۳ مشخصات جرم و سختی معادل سازهٔ برشی شش درجهٔ آزادی

درجهٔ آزادی دینامیکی	M (kg*10^5)	K (kg/cm)*10^8
۱	۲/۲٥	۲/۷۷۹
۲	۲/۲٥	۲/۷۷۹
۳	۲/۲٥	۲/۷۷۹
٤	۲/۲٥	۲/٤۳۱
٥	۲/۲٥	۱/۷۳۷
٦	۱/٥۸	۰/٦۹٤

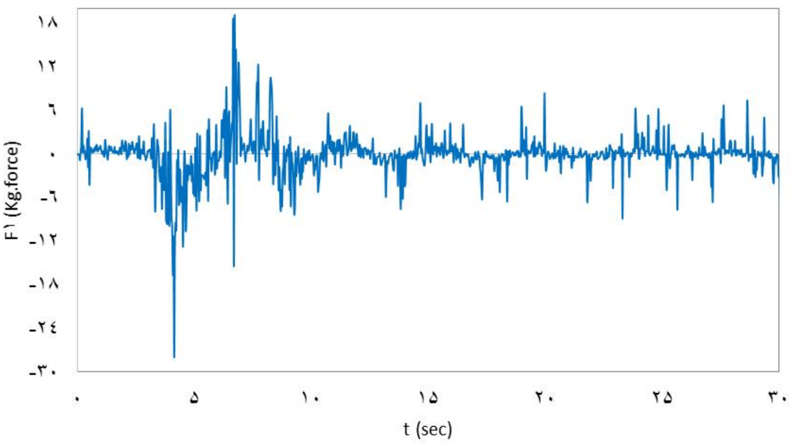
در این سازه، نسبت میرایی برای سه مود نخست نوسان ٥٪ پنداشته می‌شود و دیگر مودهای نوسان نامیرا می‌باشند. این سازه با شتاب پایهٔ زلزلهٔ نورثریج تحریک می‌شود. هم‌چنین، در هر درجهٔ آزادی یک عملگر نصب می‌گردد (شش عملگر در کل سازه). گام زمانی تحلیل برابر ۰/۰۱ ثانیه، تعداد عضوهای جمعیت تولیدشده توسط الگوریتم ژنتیک، ٦ عضو و تعداد تلاش در هر گام زمانی، ۲۰ بار فرض می‌گردد. نسبت عملگر پیوند و جهش برروی اعضا به‌ترتیب، ۰/۸ و ۰/۳ می‌باشند. در این حالت، میانگین تأخیر زمانی محاسبه‌شده توسط الگوریتم ژنتیک پیشنهادی، در هر گام زمانی، ۰/۰۱۷ ثانیه می‌باشد. بااستفاده از روش الگوریتم ژنتیک پیشنهادی، نوسان‌های سازه کنترل می‌شوند. نمودارهای جابه‌جایی- زمان درجه‌های آزادی نخستین و ششمین سازه، در حالت‌های بدون کنترل و استفاده از الگوریتم ژنتیک پیشنهادی، به‌ترتیب، در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) رسم شده‌اند. برپایهٔ این شکل‌ها می‌توان دریافت شیوهٔ پیشنهادی توانایی مناسبی در کاهش نوسان‌های سازه دارد. هم‌چنین شکل های (۱٤) تا (۱٦)، به‌ترتیب، تغییرات نیروی عملگر نخست و ششمین درجهٔ آزادی را در بازهٔ زمانی کنترل نشان می‌دهند. روشن است، مقدار نیروی عملگر به‌اندازه‌ای کوچک است که می‌توان آن را با ابزار و شیوه‌های متداول به سازه اعمال کرد. ازسوی‌دیگر، مقدارهای بیشینه جابه‌جایی و نیروی عملگر برای همهٔ درجه‌های آزادی در جدول (٤) درج شده‌است.



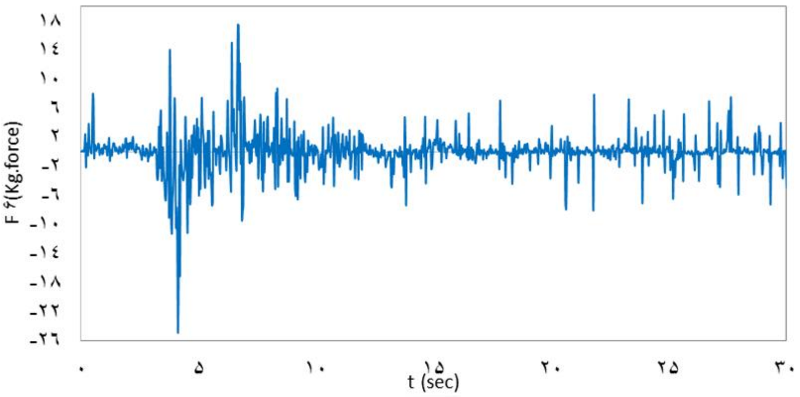
شکل ۱۱ تاریخچهٔ زمانی جابه‌جایی نخستین درجهٔ آزادی سازهٔ شش‌طبقه



شکل ۱۲ تاریخچهٔ زمانی جابه‌جایی ششمین درجهٔ آزادی سازهٔ شش‌طبقه



شکل ۱۳ تغییرات نیروی عملگر در نخستین درجهٔ آزادی سازهٔ شش‌طبقه با روش الگوریتم ژنتیک پیشنهادی



شکل ١٤ تغییرات نیروی عملگر در ششمین درجهٔ آزادی سازهٔ شش‌طبقه با روش الگوریتم ژنتیک پیشنهادی

جدول ٤ بیشینهٔ تغییرمکان‌ها و نیروی عملگرها در سازهٔ شش‌طبقه

درجهٔ آزادی دینامیکی	بیشینهٔ جابه‌جایی در حالت بدون کنترل (cm)	بیشینهٔ جابه‌جایی در حالت کنترل با الگوریتم ژنتیک(cm)	نیروی عملگر (Kg. force)
۱	٦/۲۲	۱/٦٤	۲۸/۰
۲	۱۱/٥۱	٤/۰۲	۲۰/۱
۳	۱٦/۳٦	٤/۹۹	۱۸/۱
٤	۲۰/۸٤	٦/۳۲	۱۸/٦
٥	۲٥/۷۹	۷/۷۲	۲۳/٥
٦	۳۰/٤۷	۸/۸٥	۲٤/۹

سازهٔ برشی دوازده درجهٔ آزادی دینامیکی

مشخصات یک ساختمان برشی دوازدطبقه در جدول (٥) ارائه شده‌است.

جدول ٥ مشخصات جرم و سختی معادل سازهٔ برشی دوازده درجهٔ آزادی

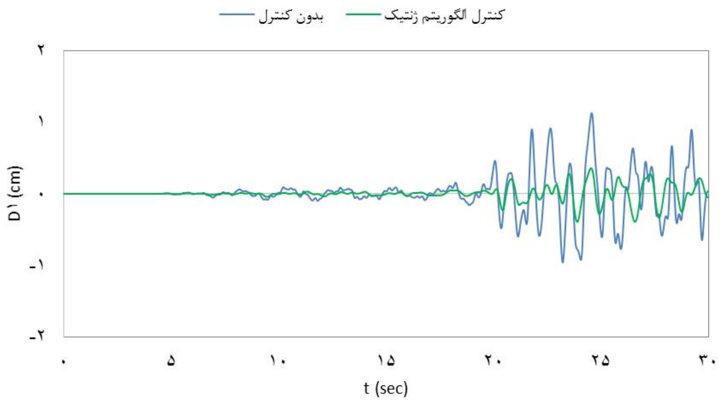
درجهٔ آزادی دینامیکی	M ($kg*10^5$)	K ($(kg/cm)*10^8$)
۱	۲/۲٥	۲/۷۷۹
۲	۲/۲٥	۲/۷۷۹
۳	۲/۲٥	۲/٤۳۲
٤	۲/۲٥	۲/٤۳۲
٥	۲/۲٥	۲/۰۸٤
٦	۲/۲٥	۲/۰۸٤
۷	۲/۲٥	۲/۰۸٤
۸	۲/۲٥	۱/۰٤۲
۹	۲/۲٥	۱/۰٤۲
۱۰	۲/۲٥	۱/۰٤۲
۱۱	۲/۲٥	۰/٦۹٥
۱۲	۱/٥۸	۰/۳٤۷

در اینجا، نسبت میرایی برای سه مود نخست نوسان برابر ٥٪ است و دیگر مودهای نوسان نامیرا می‌باشند. این سازه تحت اثر شتاب پایهٔ زلزلهٔ کوبه قرار می‌گیرد و به هر درجهٔ آزادی آن نیز یک عملگر متصل می‌شود. گام زمانی تحلیل دینامیکی ۰٫۰۱ ثانیه، تعداد عضوهای جمعیت تولیدشده توسط الگوریتم، ۸ عضو و تعداد تلاش‌ها در هر گام زمانی، ۲۰ بار می‌باشد. هم‌چنین، نسبت عملگر پیوند و جهش برروی اعضا به‌ترتیب، ۰/۸ و۰/۳ می‌باشند. در این حالت، میانگین تأخیر زمانی محاسبه‌شده توسط الگوریتم ژنتیک پیشنهادی، در هرگام زمانی، ۰/۰۲٦ ثانیه است. بااستفاده از روش الگوریتم ژنتیک پیشنهادی، نمودارهای تغییرمکان- زمان نخستین و دوازدهمین درجهٔ آزادی سازه، به‌ترتیب، در شکل‌های (۱٥) و (۱٦) نشان داده شده‌است. هم‌چنین، شکل‌های (۱۷) و (۱۸) به‌ترتیب، تغییرات نیروهای عملگرهای نخستین و دوازدهمین طبقه را نشان می‌دهند. بیشینهٔ تغییرمکان‌ها و نیروهای عملگرهای طبقه‌های مختلف نیز در جدول (٦) درج گردیده‌اند.

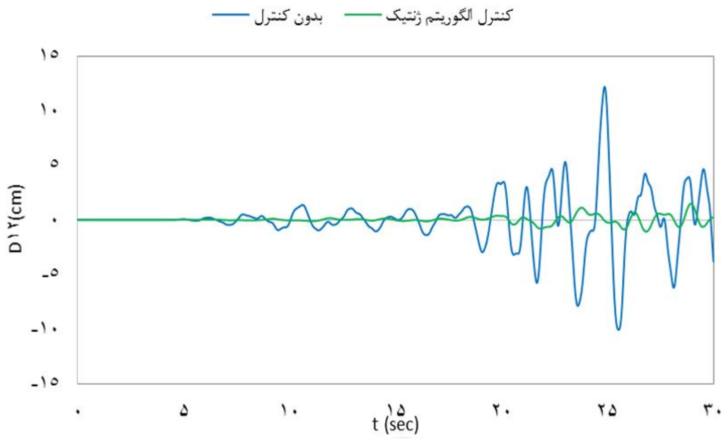
همان‌گونه که در شکل‌های (۱٥) و (۱٦) دیده می‌شود، استفاده از الگوریتم ژنتیک پیشنهادی کاهش چشم‌گیری در نوسان‌های سازه ایجاد می‌کند. درنتیجه، کارایی فرایند کنترل افزایش می‌یابد. ازسوی‌دیگر، داده‌های جدول (٦) نشان می‌دهند، استفاده از چندین عملگر در سازه و تعیین آنها با الگوریتم ژنتیک پیشنهادی بیشینهٔ تغییرمکان‌های سازه را می‌کاهد. هم‌چنین، به‌کارگیری چندین عملگر سبب شده‌است، بیشینهٔ نیروهای اعمالی توسط عملگرها نیز کاهش یابد. این موضوع کارایی روش پیشنهادی را افزایش می‌دهد؛ زیرا در حالت واقعی

عملگرها، نیروی آنها نیز افزایش می‌یابد و ایجاد آنها توسط ابزارهای موجود دشوار می‌گردد.

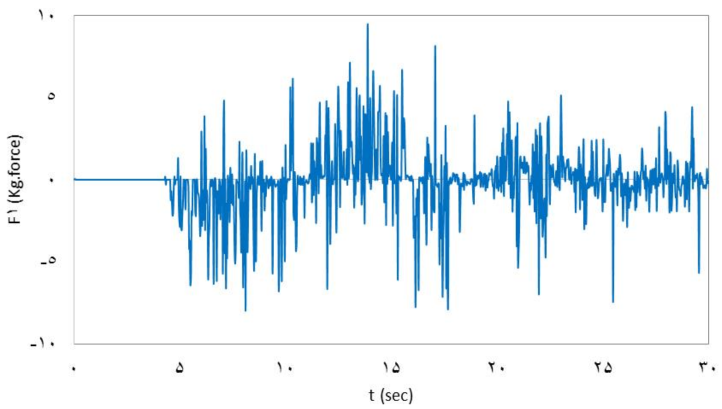
امکان ایجاد چنین نیروهایی وجود دارد. با کاهش تعداد



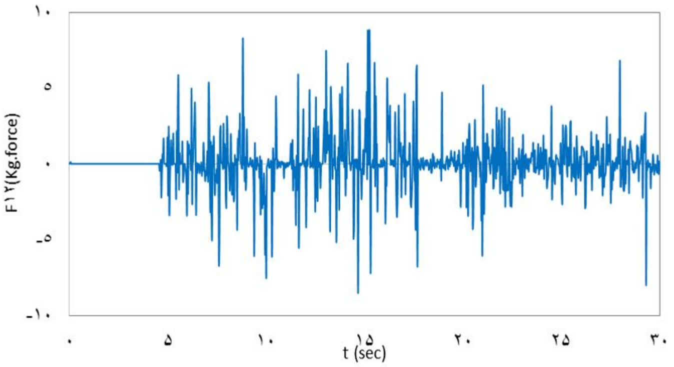
شکل ۱۵ تاریخچهٔ زمانی جابه‌جایی نخستین درجهٔ آزادی سازهٔ دوازده‌طبقه



شکل ۱٦ تاریخچهٔ زمانی جابه‌جایی دوازدهمین درجهٔ آزادی سازهٔ دوازده‌طبقه



شکل ۱۷ تغییرات نیروی عملگر در نخستین درجهٔ آزادی سازهٔ دوازده‌طبقه با روش الگوریتم ژنتیک پیشنهادی



شکل ۱۸ تغییرات نیروی عملگر در دوازدهمین درجهٔ آزادی سازهٔ دوازده‌طبقه با روش الگوریتم ژنتیک پیشنهادی

جدول ٦ جدول مقایسهٔ نیرو و بیشینهٔ تغییرمکان‌های سازهٔ دوازده درجهٔ آزادی در حالت کنترل‌یافته با الگوریتم ژنتیک و بدون کنترل

درجهٔ آزادی دینامیکی	بیشینهٔ جابه‌جایی در حالت بدون کنترل (cm)	بیشینهٔ جابه‌جایی در حالت کنترل با الگوریتم ژنتیک(cm)	نیروی عملگر (Kg. force)
۱	۱/۱۳	۰/۵۸	۹/٤۷
۲	۲/۲۱	۰/۹۱	۹/۰۸
۳	۳/۱۸	۰/۷۵	۹/۲٤
٤	٤/۳۰	۰/٦۹	۹/٦۸
۵	۵/۰۳	۰/۷۸	۸/۹٦
٦	٦/۲۷	۰/۹۲	۸/۹٦
۷	٦/٦۷	۰/۹۵	۹/۸۲
۸	۷/۰۳	۱/۱٦	۹/۰۵
۹	۷/۷۲	۱/۱٦	۸/۵۳
۱۰	۸/۹٦	۰/۹۹	۹/۹۳
۱۱	۱۲/۲۳	۰/۸۳	۸/٤۸
۱۲	۱۲/۸۱	۱/٤۸	۸/۸۱

باید دانست، هدف از این پژوهش معرفی یک شیوهٔ کنترل فعال جدید برمبنای الگوریتم ژنتیک می‌باشد که در آن تأخیر زمانی کاهش می‌یابد. این فرایند مستقل از شیوهٔ پیاده‌سازی عملی این الگوریتم برروی سازهٔ میزبان می-باشد. باوجوداین، روش‌های کنترل فعال را می‌توان بااستفاده از عملگرها و حسگرهای پیزوالکتریک در سازه‌ها اجرا کرد. حسگرهای پیزوالکتریک وسایلی هستند که در آنها شتاب حرکت بااستفاده از ویژگی‌های پیزوالکتریک تعیین می‌گردد. در شتاب‌نگارهای پیزوالکتریک، متناسب با تنش ایجادشده در ساختار میکروسکوپی بلوره‌ها ناشی از نیروهای اینرسی، ولتاژی تولید خواهد شد و مبنایی برای اندازه‌گیری شتاب می-باشد. فرایند مشابهی در عملگرهای پیزوالکتریک انجام می‌شود و نیرو تولید می‌شود. ازسوی‌دیگر، با افزایش تعداد عملگرها، نیروی آنها کاهش می‌یابد. درنتیجه، می-توان این شیوه را در سازه‌های واقعی به‌راحتی اجرا کرد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک شـــیوهٔ نوین برای پایش فعال نوسان‌های سازه ارائه گردید. شیوهٔ کنترل پیشنهادی از روش جســـتجوی عددی الگوریتم ژنتیک برای یافتن مقدارهای بهینهٔ نیروهای کنترلی عملگرها اســـتفاده می‌کند. در اینجا، با جســـتجوی مســـتقیم جابه‌جایی در معادلهٔ تعادل دینامیکی ســـازه و ارزیابی داده‌ها با معیار تابع هدف مقید، نیروهای کنترلی به‌گونه‌ای پیدا شـــدند، که پاسخ سـازه کمینه شـود. باتوجه به ماهیت تخمین-تصـــحیح این روش، اثر تأخیر زمانی پدیدآمده در هر نمونه تحلیل بررسی شد. دردامه، از سه نمونهٔ عددی برای بررسی کارایی الگوریتم ژنتیک پیشنهادی استفاده گردید. نتایج نشان می‌دهند روش کنترل فعال ارائه شده توانســـته‌اســـت کاهش چشـــم‌گیری در دامنهٔ نوســـان‌های ســـــازه ایجاد کند. افزایش کارایی و بهبود عملکرد الگوریتم ژنتیک پیشنهادی به دو دلیل می‌باشد. نخست این‌که در اینجا یک تابع هدف مقید نوین ارائه گردید. ازســـوی‌دیگر، تأخیر زمانی در فرایند الگوریتم ژنتیک کاهش یافت. این دو موضـــوع ســـبب شـــد، روش پیشـــنهادی کارایی مناســـبی در کنترل فعال نوســـان‌های نمونه‌های عددی داشته باشد.

مراجع

1. Tzou, H., Lee, H.-J. and Arnold, S., "Smart Materials, Precision Sensors/actuators, Smart Structures, and Structronic Systems", *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, Vol. 11, Pp. 367-393, (2004).
2. Yao, J. T., "Concept of Structural Control", *Journal of the Structural Division*, Vol. 98, Pp. 1567-1574, (1972).
3. Yang, J. N., "Instantaneous Optimal Control for Linear, Nonlinear and Hysteretic Structures-stable Controllers", (1991).
4. Jabbari, F., Schmitendorf, W., and Yang, J., "H∞ Control for Seismic-excited Buildings with Acceleration Feedback", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 121, Pp. 994-1002, (1995).
5. Yang, J. and Soh, C. K., "Structural Optimization by Genetic Algorithms with Tournament Selection", *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 11, Pp. 195-200, (1997).
6. Holland, J. H., "Outline for a Logical Theory of Adaptive Systems", *Journal of the ACM (JACM)*, Vol. 9, Pp. 297-314, (1962).
7. 2esley Publishing Company, R eading, MA, Vol. 1, P. 9, (1989).
8. Houck, C. R., Joines, J. and Kay, M. G., "A Genetic Algorithm for Function Optimization: A Matlab Implementation", NCSU-IE TR, Vol. 95, (1995).
9. Safizadeh, M. R. and Darus, I. Z., "Optimal Location of Sensor for Active Vibration Control of Flexible Square Plate", in Information Sciences Signal Processing and their Applications (ISSPA), *10th International Conference on*, Pp. 393-396, (2010).
10. Cha, Y.-J., Agrawal, A. K., Kim, Y. and Raich, A. M., "Multi-objective Genetic Algorithms for Cost-effective Distributions of Actuators and Sensors in Large Structures", *Expert Systems with Applications*, Vol. 39, Pp. 7822-7833, (2012).
11. Cha, Y. J., Raich, A., Barroso, L. and Agrawal, A., "Optimal Placement of Active Control Devices and

Sensors in Frame Structures Using Multi-Objective Genetic Algorithms", *Structural Control and Health Monitoring*, Vol. 20, Pp. 16-44, (2013).

12. Hale, J. and Daraji, A., "Optimal Placement of Sensors and Actuators for Active Vibration Reduction of a Flexible Structure Using a Genetic Algorithm Based on Modified Hinfinity", *Journal of Physics: Conference Series*, P. 012036, (2012).
13. Abbasi, M. and Markazi, A., "Optimal Assignment of Seismic Vibration Control Actuators Using Genetic Algorithm", *International Journal of Civil Engineering*, Pp. 24-31, (2014).
14. Zhai, J., Zhao, G. and Shang, L., "Integrated Design Optimization of Structure and Vibration Control with Piezoelectric Curved Shell Actuators", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, P. 1045389X16641203, (2016).
15. Zhu, K., Gu, C., Qiu, J., Liu, W., Fang, C. and Li, B., "Determining the Optimal Placement of Sensors on a Concrete Arch Dam Using a Quantum Genetic Algorithm", *Journal of Sensors*, Vol. 2016, (2016).
16. Kumar, M. S. and Vijayarangan, S., "Design of LQR Controller for Active Suspension System", (2006).
17. Clough, R. and Penzien, J., "Dynamics of Structures", McGraw Hill, New York, (1993).
18. Miyamoto, K., Sato, D. and She, J., "A New Performance Index of LQR for Combination of Passive Base Isolation and Active Structural Control", *Engineering Structures*, Vol. 157, Pp. 280-299, (2018).
19. Elumalai, V. K. and Subramanian, R. G., "A New Algebraic LQR Weight Selection Algorithm for Tracking Control of 2 DoF Torsion System", *Archives of Electrical Engineering*, Vol. 66, Pp. 55-75, (2017).
20. Oliveira, F., Morais, P. and Suleman, A., "A Comparative Study of Semi-active Control Strategies for Base Isolated Buildings", *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, Vol. 14, Pp. 487-502, (2015).
21. Tairidis, G., Foutsitzi, G. and Stavroulakis, G. E., "A Multi-layer Piezocomposite Model and Application on Controlled Smart Structures", *Advances in Mechanics of Materials and Structural Analysis*, ed: Springer, Pp. 3.65-385, (2018).
22. Newmark, N. M., "A Method of Computation for Structural Dynamics", *Journal of the engineering mechanics division*, Vol. 85, Pp. 67-94, (1959).
23. Goudreau G. L., and Taylor, R. L., "Evaluation of Numerical Integration Methods in Elastodynamics", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 2, Pp. 69-97, (1973).
24. Holland, J., "Book: Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis with Applications to Biology", *Control, and Artificial Intelligence*, (1975).
25. Forrest, S., "Genetic Algorithms- Principles of Natural Selection Applied to Computation", *Science*, Vol. 261, Pp. 872-878, (1993).
26. Lobo, F., Lima, C. F. and Michalewicz, Z., Parameter Setting in Evolutionary Algorithms, Vol. 54: Springer Science & Business Media, (2007)